

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月14日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560823

研究課題名（和文） 核融合炉低放射化材料異種溶接継手の腐食と耐照射性

研究課題名（英文） Corrosion and resistance to irradiation of dissimilar weld joints of low activation materials for fusion reactor

研究代表者

長坂 琢也 (NAGASAKA TAKUYA)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：40311203

研究成果の概要（和文）：

本研究では、低放射化材料と一般原子炉材料の溶接継手を試作し、溶接部の機械特性、微細組織及び、基本的な照射特性と腐食特性を調査した。低放射化フェライト鋼-316Lステンレス鋼継手溶接部の照射硬化は母材 316L ステンレス鋼と同程度であり、溶接部における照射硬化、照射脆化の促進は無いことが示唆された。低放射化バナジウム合金共金溶接継手の腐食試験において、脆化は確認されなかった。バナジウム-316L ステンレス鋼継手では、脆い金属間化合物の生成により、継手の使用限界は 600℃以下にあることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In the present study, weld joints between low activation materials and commercial nuclear reactor materials were fabricated. Their mechanical properties, microstructures, fundamental irradiation properties and corrosion properties were investigated. Since irradiation hardening at weld metal of low activation ferritic steel-316L stainless steel joints were similar to that for the base metal 316L stainless steels, it is indicated that irradiation hardening and hence irradiation embrittlement are not enhanced in the weld metal. Corrosion tests on weld joints for low activation vanadium alloy exhibited no embrittlement. It is revealed that operation temperature limit for vanadium-316L stainless steel joints is below 600oC due to formation of brittle intermetallics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：低放射化材料、核融合炉ブランケット

1. 研究開始当初の背景

低放射化フェライト鋼では、日、欧、中、

露が、バナジウム合金では日、米、露が大量溶解を実施し、実用規模の板材を用いて溶接研究を開始している。代表者は日本の大量溶解 V 合金開発に携わってきた。従来の V 合金溶接材は脆く、室温でも脆性破壊をすることが問題であったが、高純度化によって世界で初めてこれを解決した。しかし、溶接金属では、母材よりも照射脆化が大きく、その使用限界は、450°Cで照射量 1 dpa（核融合炉での要求値は 100 dpa）であることも明らかとなった。この問題に対しては、脆化のメカニズムを解析し、酸素不純物と照射欠陥の相互作用で引き起こされる照射硬化が主因であることをつきとめた。この不純物を溶接後熱処理によって適当に析出させることで、照射硬化を軽減させることに成功しており、さらなる照射実験を継続している。フェライト鋼でも溶接部の照射脆化促進は同様であり、ここでも溶接後熱処理で照射脆化を軽減しようという試みがなされている。

上述のように、共金溶接の研究は進展しているが、異種溶接の研究は極めて限られている。核融合炉ブランケットは低放射化材料で製作されるが、炉外の熱回収系、トリチウム回収系機器は低放射化材料である必要はなく、既存の工業材料である 316L ステンレス鋼等が使用されることになる。そこで、低放射化材料と 316L ステンレス鋼等との異種溶接が必要となる。国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画ではテストブランケットモジュールを含めた冷却・トリチウム回収システムを製作する段階にあり、異種溶接は緊急の課題である。

2. 研究の目的

本研究では、核融合炉での使用が想定される、低放射化フェライト鋼-316L ステンレス鋼継手、及びバナジウム-316L ステンレス鋼継手を試作し、基本的な機械特性、高温 Li 環境での腐食及び照射特性を評価するとともに、接合機構を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

低放射化フェライト鋼は原子力研究機構製作の F82H (Fe-8Cr-2W-VNbTa) 鋼 IEA ヒート、低放射化バナジウム合金は大学共通試料である高純度 NIFS-HEAT-2 (V-4Cr-4Ti) 合金、さらに市販の 316L ステンレス鋼を用いた。溶接材は電子ビーム溶接で試作した。まず基本的な機械試験により、実際に使用できる溶接材であることを確認するため以下の試験を行った。要件とともに示す。

- ・引張試験：母材で破断し、絞りは溶接前と同程度であること（溶接金属、熱影響部で強度低下がない）

- ・曲げ試験：180° の表曲げ、裏曲げにおい

て表面で亀裂が発生しないこと（溶接欠陥が無く延性大）

- ・衝撃試験：溶接金属、熱影響部の延性脆性遷移温度が母材並みであること（靱性の低下が小さいこと）

さらに、700~800°Cの範囲で 1 h の溶接後熱処理を行い、その機械特性と微細組織に及ぼす影響について検討した。

腐食試験においては、液体増殖材である液体リチウム中で、共金溶接継手で 700°C×100 hr の浸漬試験を行った。

加速器照射試験を行い、溶接部の照射硬化が母材より大きくならないかどうかを調査した。

4. 研究成果

低放射化フェライト鋼-316L ステンレス鋼継手の電子ビーム溶接による試作においては、電子ビームの照射位置を突合せ位置から 0.2 mm、316L ステンレス鋼側にシフトさせ、さらに適当な溶接後熱処理 (720°C×1 h) で軟化させれば、低放射化フェライト鋼母材並みの衝撃特性を得られることが明らかとなった。

継手の照射試験の結果、溶接部の照射硬化は母材 316L ステンレス鋼と同程度であり、溶接部における照射硬化、照射脆化の促進は無いことが示唆された。

腐食試験においては、液体増殖材である液体リチウム中で、低放射化バナジウム合金共金溶接継手で 700°C×100 hr の浸漬試験を行った。衝撃試験を行ったところ、リチウム浸漬による衝撃エネルギーの低下は確認されなかった。

バナジウム-316L ステンレス鋼継手の電子ビーム溶接による試作においては、接合後の 600°C×1 hr の熱負荷でニッケル-バナジウム及び鉄-バナジウムの金属間化合物が生成して接合部が著しく硬化し、脆化することが明らかとなった。よって、継手の使用限界は 600°C以下にあることを明らかにした。核融合炉での使用温度を 600°C以上と想定した場合、金属間化合物生成量を抑えるために、非溶融の接手法、例えば拡散接合により継手を製作するか、金属間化合物のうち、鉄-バナジウムによるものを抑えるために 316L ステンレス鋼の代わりにニッケル系合金を使用すること等を検討するべきである。

以上より、核融合炉で使用する可能性のある溶接継手の基本特性と、今後改善すべき課題が明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) T. Nagasaka, T. Muroga, H. Watanabe, T. Miyazawa, M. Yamazaki, K. Shinozaki, "Impact Property of Low-activation Vanadium Alloy after Laser Welding and Heavy Neutron Irradiation," Journal of Nuclear Materials, 査読有, 受理, 2013 発行予定.
- (2) T. Nagasaka, T. Muroga, T. Miyazawa, H. Watanabe, M. Yamazaki, "Impact properties of low activation vanadium alloy after low-temperature neutron irradiation at 450 °C and below," Fusion Science and Technology, 査読有, Vol. 60, 2011, pp. 379-383.
- (3) S. Nogami, N. Hara, T. Nagasaka, A. Hasegawa, T. Muroga, "Effect of PWHT on the Mechanical and Metallographical Properties of a Dissimilar-Metal Weld Joint of F82H and SUS316L Steels," Fusion Science and Technology, 査読有, Vol. 60, 2011, pp. 334-338.
- (4) S. Nogami, J. Miyazaki, T. Nagasaka, A. Hasegawa, T. Muroga, "Study on Dissimilar-Material Welding with Vanadium and Austenitic Stainless Steel," Fusion Science and Technology, 査読有, Vol. 60, 2011, pp. 417-421.

[学会発表] (計 11 件)

- (1) T. Nagasaka, T. Muroga, H. Watanabe, T. Miyazawa, M. Yamazaki, "Correlation between Irradiation Hardening and Microstructural Evolution in High Purity Reference V-4Cr-4Ti Alloy for Fusion Reactor," TMS 2013 142nd ANNUAL MEETING & EXHIBITION, 2013 年 03 月 03 日~2013 年 03 月 07 日, サンアントニオ (米国).
- (2) T. Nagasaka, T. Muroga, H. Watanabe, T. Miyazawa, M. Yamazaki, K. Shinozaki, "Impact Property of Low-Activation Vanadium Alloy after Laser Welding and Heavy Neutron Irradiation," 15th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2011 年 10 月 16-22 日, チャールストン (米国).
- (3) T. Nagasaka, J. M. Cheng, V. M. Chernov, M. L. Flem, K. -i. Fukumoto, R. J. Kurtz, T. Muroga, B. Pint, M. M. Potapenko, A. N. Tyumentsev, H. Watanabe, "Overview of the Development of Vanadium Alloys," 15th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2011 年 10 月 16-22 日, チャールストン (米国).
- (4) S. Nogami, J. Miyazaki, A. Hasegawa, T. Nagasaka, T. Muroga, Study on

Electron Beam Welding of Vanadium and SUS316L Stainless Steel," 15th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2011 年 10 月 16-22 日, チャールストン (米国).

- (5) T. Nagasaka, Y. Hishinuma, T. Muroga, H. Watanabe, M. Yamazaki, "Impact properties of low activation vanadium alloy after low-temperature neutron irradiation below 400°C," 19th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, 2010 年 11 月 7 日~11 日, ラスベガス (米国).
- (6) S. Nogami, N. Hara, T. Nagasaka, A. Hasegawa, T. Muroga, "Effect of PWHT in dissimilar weld joint with F82H and SUS316L steel," 19th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, 2010 年 11 月 7 日~11 日, ラスベガス (米国).
- (7) S. Nogami, J. Miyazaki, T. Nagasaka, A. Hasegawa, T. Muroga, "Study on dissimilar welding with vanadium and austenitic stainless steel," 19th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, 2010 年 11 月 7 日~11 日, ラスベガス (米国).
- (8) 宮崎純平, 野上修平, 長坂琢也, 長谷川晃, 佐藤学, 室賀健夫, "バナジウム合金とオーステナイトステンレス鋼の異材溶接に関する研究," 第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 2010 年 6 月 10 日~11 日, 高山市民文化会館.
- (9) 長坂琢也, 室賀健夫, 渡辺英雄, 山崎正徳, "400°C以下の低温中性子照射後の低放射化バナジウム合金の衝撃特性," 日本原子力学会「2010 年秋の年会」2010 年 9 月 15 日~17 日 北海道大学
- (10) 長坂琢也, 宮澤健, 室賀健夫, 渡辺英雄, 山崎正徳, "低放射化バナジウム合金の耐低温照射脆化特性," 第 27 回プラズマ・核融合学会年会, 2010 年 11 月 30 日~12 月 3 日, 北海道大学.
- (11) 宮崎純平, 野上修平, 長坂琢也, 長谷川晃, 室賀健夫, "低液体リチウム冷却ブランケットのためのバナジウム合金とステンレス鋼の異材接合に関する研究," 第 27 回プラズマ・核融合学会年会, 2010 年 11 月 30 日~12 月 3 日, 北海道大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長坂 琢也 (NAGASAKA TAKUYA)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 40311203

(2)研究分担者

室賀 健夫 (MUROGA TAKEO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：60174322

四竈 樹男 (SHIKAMA TATSUO)

東北大学・金属材料研究所 教授

研究者番号：30196365

野上 修平 (NOGAMI SHUHEI)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00431528

(3)連携研究者

なし